

Technical Paper

Perkembangan Desain dan Kinerja Aerator Tipe Kincir*Design and Performance of Paddle Wheel Aerator Development*

Samsul Bahri, Mahasiswa pascasarjana Ilmu Keteknikan Pertanian Institut Pertanian Bogor dan
 Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe, Email: soel_73@yahoo.com
 Radite Praeko Agus Setiawan, Departemen Teknik Pertanian, Institut Pertanian Bogor.
 Email: iwan_radit@yahoo.com
 Wawan Hermawan, Departemen Teknik Pertanian, Institut Pertanian Bogor.
 Email: w_hermawan@ipb.ac.id
 Muhammad Zairin Yunior, Departemen Budidaya Perairan, Institut Pertanian Bogor.

Abstract

Paddle wheel aerator widely used in aquaculture because it has the function of aeration and circulation as well as their construction is simple. However, its efficiency is not maximized so it is still expensive in operation because of the large power consumption. Aerator performance is an important factor in the selection and use of the aerator as it relates to investment and operating cost, so the paddle wheel aerator design development and improvement of the performance of the operation is still possible to do. Developing of three-dimensional blade with the optimum geometry and blade development that can move is a solution that can be done. The study aims to review the principle of aeration, performance test, evaluation criteria, and performance comparison aerator design development that have been made so as to provide an alternative to the developing of performance improvement paddle wheel aerator. This article is a summary of the "state of the art" design and performance of a paddle wheel aerator development.

Keywords : design, aeration, paddle wheel, dissolved oxygen, efficiency

Abstrak

Aerator kincir banyak digunakan dalam budidaya air karena mempunyai fungsi aerasi dan sirkulasi yang baik serta konstruksinya sederhana. Namun demikian, efisiensinya belum maksimal sehingga masih mahal dalam pengoperasian karena besarnya pemakaian daya listrik. Kinerja aerator merupakan faktor penting dalam pemilihan dan penggunaan aerator karena berhubungan dengan biaya investasi dan operasional, sehingga pengembangan desain aerator kincir dan peningkatan kinerja pengoperasian masih memungkinkan untuk dilakukan. Pengembangan sudu tiga dimensi dengan geometri optimumnya dan pengembangan sudu yang dapat bergerak merupakan solusi yang dapat dilakukan. Kajian ini bertujuan menelaah kembali prinsip aerasi, uji kinerja, kriteria evaluasi, perbandingan kinerja dan perkembangan desain aerator yang sudah dilakukan sehingga dapat memberikan alternatif pengembangan guna peningkatan kinerja aerator kincir. Artikel ini merupakan rangkuman dari "state of the art" desain dan kinerja aerator kincir untuk penggunaan budidaya air.

Kata kunci: desain, aerasi, kincir, kelarutan oksigen, efisiensi.

Diterima: 12 November 2013; Disetujui: 15 Januari 2014

Pendahuluan

Tingkat keberhasilan budidaya tambak secara intensif sangat dipengaruhi oleh kemampuan petani untuk mengatasi penurunan kualitas air yang salah satunya masalah kelarutan oksigen yang rendah. Oksigen terlarut (*dissolved oxygen* atau *DO*) merupakan faktor yang sangat penting dalam budidaya ikan dan udang. Kekurangan oksigen dapat membahayakan hewan air karena bisa menyebabkan stress, mudah tertular penyakit, menghambat pertumbuhan bahkan

dapat menyebabkan kematian sehingga dapat menurunkan produktifitasnya (Kordi & Tacung, 2007). Atas dasar itulah perlu dilakukan usaha penyegaran kembali air atau aerasi dengan menggunakan aerator.

Salah satu tipe alat aerasi adalah aerator kincir (*paddle wheel*) yang mana merupakan aerator yang paling umum digunakan untuk tambak budidaya air (Wyban *et al.* 1989; Moore & Whitis 1999; Laksitanonta *et al.* 2003). Hal ini dikarenakan aerator kincir merupakan alat aerasi yang paling baik dari segi mekanisme aerasi dan tenaga penggerak yang

dapat digunakan (Avnimelech *et al.* 1992; Romaine & Merry 2007).

Beberapa model aerator tipe kincir, seperti aerator Taiwan tersedia di pasaran dan dipergunakan secara meluas karena harga yang relatif murah, ringan dan tahan korosi, namun aerator ini memiliki efisiensi aerasi yang rendah (Wyban 1989; Laksitanonta, 2003). Aerator buatan atau desain Taiwan mempunyai nilai SAE (standard aeration efficiency) $1.063 \text{ kg O}_2 \text{ kW h}^{-1}$ (Peterson & Walker 2002). Aerator rancangan Bhuyar *et al* (2009) mempunyai nilai SAE $2.269 \text{ kg O}_2 \text{ kWh}^{-1}$. Aerator kincir terbaik adalah rancangan Moore dan Boyd dengan nilai SAE $2.54 \text{ kg O}_2 \text{ kWh}^{-1}$. Beberapa pabrikan menggunakan dasar rancangan aerator 2.25-7.5 kW dengan nilai SOTR 17.4- 23.2 $\text{kg O}_2 \text{ h}^{-1}$ dan nilai SAE rata-rata nilai $2.2 \text{ kg O}_2 \text{ kW h}^{-1}$ (Moore & Boyd 1992).

Laju aerasi dipengaruhi oleh luas permukaan kontak air dan udara, perbedaan konsentrasi oksigen, koefisien lapisan film dan turbulensi yang terjadi (Boyd 1998). Geometri, ukuran, dan kecepatan putaran kincir mempengaruhi kinerja aerasi (Peterson & Walker 2002; Moulick *et al.* 2002). Kincir dengan ukuran yang lebih besar mempunyai kecenderungan aerasi yang lebih besar. Namun peningkatan laju aerasi tersebut selalu diikuti oleh besarnya tahanan gerak dari sudu sehingga membutuhkan tenaga penggerak kincir yang besar pula. Besarnya tenaga penggerak ini merupakan permasalahan tersendiri dalam penggunaan aerator tipe kincir karena berkenaan dengan biaya operasional yaitu konsumsi daya listrik ataupun penggunaan bahan bakar.

Bertolak dari pemikiran tersebut, maka akan dilakukan telaahan perkembangan desain dan kinerja aerator sehingga memberi alternatif pengembangan dan perbaikan desain guna peningkatan kinerja aerator tipe kincir.

Prinsip Aerasi

Aerasi adalah penambahan udara yang mengandung oksigen kedalam air. Aerasi dapat dilakukan dengan bantuan alat mekanik yang disebut aerator (Boyd, 1982). Aerasi dapat dilakukan dengan dua cara; yang pertama udara dimasukkan ke dalam air dengan dideburkan (*splasher aerator*) dan yang kedua gelembung udara dilepaskan ke dalam air (*bubbler aerator*). Seberapa banyak dan cepat gas (oksigen) dipindahkan kedalam dan keluar dari air tergantung pada kondisi kesetimbangan (konsentrasi jenuh) dan perpindahan massa (Boyd, 1998; Lekang, 2007).

Menurut Lekang (2007) pelarutan oksigen dalam air terjadi melalui tiga tahapan, yaitu gas oksigen dari udara menuju permukaan film, kemudian berdifusi melalui permukaan film dan terakhir bergerak kedalam massa air. Gaya dorong menyebabkan oksigen masuk ke air yang kurang jenuh dimana adanya perbedaan tekanan oksigen dalam air dan

tekanan oksigen di udara. Perbedaan ini lebih besar ketika konsentrasi DO dalam air 0 mg l^{-1} . Peningkatan konsentrasi DO dalam air menurunkan kekurangan oksigen (gaya dorong berkurang), sehingga laju pemindahan oksigen dari sebuah aerator menurun sebagaimana meningkatnya konsentrasi DO.

Tekanan oksigen di udara membawa oksigen ke dalam air hingga tekanan oksigen dalam air sama dengan tekanan oksigen di atmosfer. Ketika tekanan oksigen dalam air dan atmosfer sama, gerakan molekul oksigen dari atmosfer menuju air berhenti. Air dikatakan menuju kesetimbangan atau jenuh dengan oksigen terlarut ketika tekanan oksigen dalam air sama dengan tekanan oksigen di udara (Boyd, 1998). Konsentrasi oksigen terlarut dalam air pada saat jenuh bervariasi berdasarkan temperatur, salinitas, dan tekanan pengukuran. Temperatur dan salinitas yang tinggi akan menurunkan kelarutan oksigen dalam air (Benson dan Krause, 1984; Ruttanagosrigit *et al*, 1991; Fast *et al*, 1999 dan Vinatea, 2007). Pada kondisi normal (26°C , 0 ppt) kelarutan oksigen sekitar 8 ppm.

Oksigen terlarut atau *dissolved oxygen (DO)* diperlukan biota air untuk pernapasannya sehingga bila ketersediaannya di dalam air tidak mencukupi maka segala aktivitas biota akan terhambat (Kordi dan Tacung, 2007). Hal ini dapat terjadi pada malam hari, karena respirasi ikan, tumbuhan dan organisme lainnya mengakibatkan konsentrasi DO menurun drastis, sedangkan pada siang hari terjadi sebaliknya karena proses fotosintesis tanaman di dalam tambak banyak menghasilkan oksigen.

Metode Pengujian

Transfer oksigen dalam tambak

Pengujian kinerja aerator dalam memindahkan oksigen dapat dilakukan dengan pengujian tunak dan tidak tunak. Pengujian tunak dilakukan dengan pemasangan aerator dalam air dan mengukur volume aliran dan konsentrasi DO sebelum dan sesudah aerasi. Selisih massa DO antara aliran masuk dan aliran keluar menunjukkan massa pemindahan oksigen menuju air oleh aerator (Boyd, 1998). Metode ini sulit dilakukan karena aerator permukaan digunakan dalam budidaya tambak yang luas sehingga dibutuhkan aliran yang besar. Pengujian tak tunak dalam kolam lebih tepat untuk mengevaluasi kinerja aerator (American Society of Civil Engineers, 1992).

Pengujian keadaan tak tunak dilakukan dengan deoksigenisasi air kolam dengan sodium sulfate dan mengukur perubahan konsentrasi DO air reoksigenisasi oleh aerator. Pengujian aerator permukaan lebih tepat dilakukan pada kolam persegi dengan kedalaman 1–1.5 m, dimana rasio daya aerator-volume air tidak boleh melebihi 0.1 kW m^{-3} .

Pengujian kinerja aerator tergantung pada tipe

aerator. Menurut Lekang (2007) secara umum laju perpindahan oksigen dapat ditentukan berdasarkan pengukuran aliran massa (Q_w) dan perbedaan konsentrasi oksigen yang masuk dan meninggalkan aerator ($C_{out} - C_{in}$). Laju perpindahan oksigen atau *oxygen transfer rate* (OTR) dapat dihitung dengan persamaan:

$$OTR = Q_w (C_{out} - C_{in}) \quad (1)$$

Jika Q_w dalam (l/min), C_{out} dan C_{in} dalam (mg O_2 /l), persamaan berikut dapat digunakan untuk mendapatkan nilai OTR dalam kg perpindahan oksigen per jam :

$$OTR = 3.6 Q_w (C_{out} - C_{in}) \quad (2)$$

Laju perpindahan oksigen standar atau *standardized oxygen transfer rate* (SOTR) dalam kg/jam diberikan oleh persamaan berikut:

$$SOTR = K_{LA20} C_{20} V \times 10^{-3} \quad (3)$$

dimana:

K_{LA20} : koefisien perpindahan gas pada pengaerasian 20 °C (kg O_2 /h)

C_{20} : konsentrasi kesetimbangan pada 20 °C (kg O_2 /h)

V : volume tangki (m^3)

10^{-3} : faktor konversi gram ke kilogram

Pengujian di atas digunakan untuk air bersih, untuk kondisi lapangan diperlukan faktor koreksi sehingga dapat digunakan persamaan berikut:

$$OTR_f = SOTR \left(\frac{\beta C_s - C_w}{C_{s20}} \right) \theta^{T-20} (\alpha) \quad (4)$$

dimana:

OTR_f : laju perpindahan oksigen aktual dibawah kondisi operasi lapang

$SOTR$: laju perpindahan oksigen standar (kg/h)

α : faktor koreksi lapang (bervariasi sesuai dengan tipe aerator, geometri kolam, dan tingkat pencampuran)

β : faktor koreksi lapang untuk perbedaan solubilitas oksigen

θ : faktor koreksi temperatur

C_s : konsentrasi oksigen pada kondisi jenuh dan temperatur pengukuran

C_{s20} : konsentrasi oksigen pada keadaan jenuh pada 20 °C

C_w : konsentrasi oksigen dalam air yang teraerasi

Semua aerator membutuhkan energi penggerak dan pemilihan aerator dengan efisiensi tinggi adalah hal yang penting, efisiensi aerasi standar atau *standardized aeration efficiency* (SAE) dalam kg O_2 / kWh dapat dihitung:

$$SAE = \frac{SOTR}{Power\ input} \quad (5)$$

Sedangkan untuk kondisi lapang, efisiensi aerasi lapang atau *field aeration efficiency* (FAE) dapat dihitung:

$$FAE = \frac{OTR_f}{Power\ input} \quad (6)$$

Efektifitas dari aerator atau *effectiveness* (E) dapat dihitung:

$$E = \frac{(C_{out} - C_{in})}{(C_{sat} - C_{in})} \times 100 \quad (7)$$

dimana:

C_{in} : konsentrasi gas dalam cairan masuk aerator atau sebelum menghidupkan aerator

C_{out} : konsentrasi gas dalam cairan keluar aerator atau setelah penggunaan aerator

C_{sat} : konsentrasi gas pada keadaan jenuh

Sirkulasi air

Kemampuan aerasi berupa penambahan oksigen merupakan fungsi utama dari aerator, disamping itu pergerakan air yang dihasilkan oleh aerator juga memberi keuntungan. Sirkulasi air selama aerasi dengan menggerakkan air teroksigenisasi dari aerator ke bagian lain tambak, menurunkan destratifikasi suhu dan kimiawi (Avnimelech, 1992. Romaine, 2007). Gerakan air yang dihasilkan oleh aerator membantu mempertahankan efisiensi tinggi perpindahan oksigen karena air teroksigenasi baru di putar menjauh dari aerator dan digantikan oleh air dengan konsentrasi DO rendah.

Moore dan Whitis (1999) menyebutkan aerasi oleh kincir menghasilkan keseragaman DO pada setiap kedalaman air dalam tambak, demikian juga hasil yang ditemukan oleh Rogers dan Fast, 1988. Air bergelombang mempunyai efek negatif terhadap peningkatan konsumsi oksigen ikan, karena ikan harus mengeluarkan energi yang lebih banyak untuk berenang, namun hal ini bukanlah faktor penting pada kondisi tambak yang baik.

Boyd dan Martinson (1984) mengemukakan dua pengujian sirkulasi air, yaitu pengujian pewarnaan dan penggaraman. Pada pengujian pewarnaan, pewarna yang sangat pekat dituang di depan aerator dan diukur waktu yang dibutuhkan aerator untuk menyebarkan pewarna pada permukaan tambak. Pengujian garam juga dapat digunakan untuk menghitung waktu yang diperlukan aerator untuk mencampur sejumlah volume air masuk ke dalam tambak. Salinitas diperoleh dari sodium clorida yang dilarutkan dalam kontainer besar dengan 100-200mg l^{-1} yang dituangkan sekeliling aerator. Hubungan spesifik diukur dengan interval tempat dan kedalaman sampai semua mempunyai nilai hubungan spesifik yang sama. Laju pencampuran dapat diestimasikan:

$$MR = \frac{A D}{P T} \quad (8)$$

dimana

MR : laju pencampuran ($\text{m}^3 \text{ kW h}^{-1}$)

A : luas tambak (m^2)

D : kedalaman (m)

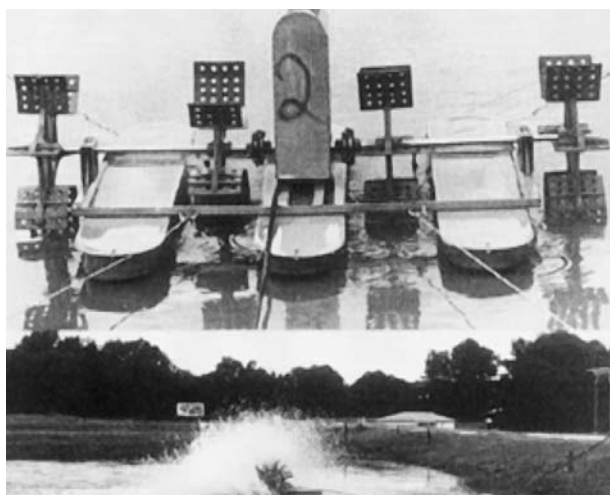
P : konsumsi daya aerator (kW)

T : waktu pencampuran (h).

Kemampuan sirkulasi air dari aerator juga dapat diestimasi dari volume air keluaran atau dari kecepatan air keluaran. Laju pemompaan dari aerator yang airnya dikeluarkan dapat diestimasi dari kurva pompa atau dari pengukuran, sedangkan kecepatan air pada interval jarak dari aerator diukur dengan meteran arus.

Perbandingan Kinerja Aerator

Sejumlah pengujian aerator telah dilakukan, khususnya dalam hal efisiensi pemindahan oksigen. Boyd dan Ahmad (1987) menguji sejumlah aerator listrik dengan nilai $SOTR$ dan SAE , dimana nilai SAE didasarkan pada estimasi daya pengereman. Hasilnya memperlihatkan nilai $SOTR$ mempunyai jangkauan lebih luas dari nilai SAE dengan aerator yang bervariasi ukuran. Data tersebut menunjukkan bahwa aerator *paddle wheel* (kincir) umumnya lebih efisien dibandingkan aerator tipe *propeller-aspirator-pump*, *vertical pump*, *pump sprayer* dan *diffused air*, dengan nilai SAE terendah dipunyai oleh aerator *diffused air*. Pengujian berikutnya oleh Boyd dan Moore (1993) menyimpulkan bahwa aerator *diffused air* dapat mempunyai nilai SAE sama baiknya dengan aerator tipe *paddle wheel* jika diffuser yang digunakan mencukupi sehingga dapat melepaskan udara menuju air dengan laju yang rendah. Jika udara dilepaskan cukup lambat, nilai SAE tinggi bahkan dapat dicapai dalam tambak dengan hanya kedalaman 1 m. Aerasi menggunakan hembusan udara dengan instalasi kedalaman diffuser 4 m dan dipasang lubang bor



Gambar 1. Aerator kincir Taiwan

dengan kedalaman 3 m pada bagian dasar dalam kedalaman tambak 1 m diperoleh SAE $6.37 \text{ kg O}_2 \text{ kW h}^{-1}$ (Boyd, 1995).

Aerator kincir yang serupa rancangan Ahmad dan Boyd (1988) lebih tinggi nilai $SOTR$ dan SAE . Beberapa pabrikan menggunakan dasar rancangan aerator 2.25-7.5 kW dengan nilai $SOTR$ 17.4- 23.2 $\text{kg O}_2 \text{ h}^{-1}$ dan nilai SAE 2.6 - 3.0 $\text{kg O}_2 \text{ kW h}^{-1}$, dimana rata-rata nilai SAE untuk aerator tersebut adalah 2.2 $\text{kg O}_2 \text{ kW h}^{-1}$.

Boyd dan ahmad (1987) menguji beberapa pompa sprayer bertenaga traktor dan aerator kincir. Nilai $SOTR$ berkisar 7.8 sampai 73.8 $\text{kg O}_2 \text{ h}^{-1}$. Daya yang diaplikasikan untuk poros aerator tidak diukur, namun untuk aerator pump sprayer membutuhkan traktor yang lebih besar dari pada aerator kincir. Satu aerator *pump sprayer* membutuhkan traktor 60 kW dan mempunyai $SOTR$ 21.2 $\text{kg O}_2 \text{ h}^{-1}$, sedangkan satu aerator kincir membutuhkan traktor 50 kW dan mempunyai $SOTR$ 29.8 $\text{kg O}_2 \text{ h}^{-1}$.

Pengujian kemampuan untuk mensirkulasikan air menunjukkan bahwa aerator *propeller aspirator pump* jauh lebih efisien dalam pencampuran air tambak dari pada aerator *vertical pump*. Sebuah aerator *propeller-aspirator-pump* 1.5 kW menyebar pewarna pada permukaan tambak 0.4 ha dalam waktu 32 menit, sedangkan sebuah aerator *vertical pump* 2.25-kW dengan waktu yang sama menyebarkan pewarna hanya seperlima permukaan tambak (Boyd and Martinson, 1984). Aerator kincir 2.25-kW menyebar pewarna pada tambak 0.4-ha dalam waktu 28 menit.

Pengujian laju pencampuran air dari aerator permukaan lebih baik diperoleh dengan pengujian pencampuran garam, sebab pengujian ini mengevaluasi pencampuran dari seluruh volume tambak bukan hanya air permukaan. Laju pencampuran untuk aerator *propeller-aspirator-pump*, aerator *vertical pump* dan aerator kincir berturut-turut adalah 1778, 305, 3235 $\text{m}^3 \text{ kW h}^{-1}$.

Pengujian kinerja pengerasian dalam kolam (Boyd and Ahmad, 1987) mengindikasikan bahwa aerator kincir lebih efisien dalam pemindahan oksigen dan pensirkulasian air dari pada aerator tipe lain yang biasa digunakan dalam budidaya air. Untuk aerator 1 kW dan lebih besar, aerator kincir sama atau lebih rendah biaya dari pada aerator lainnya. Bagaimanapun, aerator kincir kecil lebih mahal dari pada tipe aerator elektrik kecil lainnya, sebab gigi motor dibutuhkan untuk aerator kincir kecil sangat mahal. Untuk alasan ini, aerator *vertical pump*, aerator *propeller-aspirator-pump* dan aerator *diffused air* lebih umum digunakan dalam tambak kecil dari pada aerator kincir meskipun aerator kincir lebih efisien (Boyd, 1998).

Meskipun aerator kincir buatan Taiwan secara luas digunakan dalam budidaya air, namun aerator ini tidak seefisien aerator tipe kincir lainnya (Gambar 1). Aerator buatan Taiwan mendominasi pasar lebih disebabkan oleh harga yang relatif tidak mahal,

ringan, cocok untuk tambak intensif, tahan korosi, dan kebaikan lainnya sehingga aerator ini sangat terkenal dalam penggunaan budidaya tambak udang intensif di Asia (Wyban et al, 1989, Peterson 2002, Laksitanonta, 2003)

Perkembangan Desain Aerator Kincir

Oleh karena beberapa keunggulan, aerator kincir terus dikembangkan dalam hal desain guna mendapatkan efisiensi yang lebih baik. Sebuah aerator kincir listrik biasanya terdiri dari sebuah motor, mekanisme reduksi kecepatan, pedal kincir dan pelampung. Efisiensi transfer oksigen aerator kincir tergantung pada rancangan dan karakteristik dari roda kincir, sehingga spesifikasi fabrikasi roda kincir sangat menentukan, sedangkan sistem pengapungan merupakan komponen yang lebih fleksibel.

Efisiensi transfer oksigen paling tinggi diperoleh dengan diameter kincir 91 cm, dengan pedal triangular 120° - 135° (sudut dalam) melingkar pada poros (Ahmad dan Boyd, 1988). Pengujian ini dilakukan dengan celupan pedal 9-11 cm kedalam air dan putaran kincir 75-80 rpm. Kedalaman celupan pedal yang bertambah mengakibatkan kebutuhan daya akan meningkat dan efisiensi pemindahan oksigen akan menurun. Daya poros optimum sekitar 1 kW untuk setiap panjang pedal kincir 40 cm. Rancangan ini bekerja baik untuk aerator 2 kW keatas.

Moore dan Boyd (1992) mengembangkan aerator kincir dengan beberapa variasi diameter kincir (61-91 cm) dan panjang kincir (15-75 cm). Pengujian dilakukan pada kedalaman celupan pedal 8-18 cm dan kecepatan 75-125 rpm. Nilai SAE tertinggi diperoleh $2.54 \text{ kg O}_2 \text{ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ dengan diameter kincir 69 cm, kedalaman pedal 10 cm pada kecepatan 75 rpm. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, Moore dan Boyd memberikan persamaan hubungan antara parameter desain dan kinerja aerator kincir kecil sebagai berikut:

$$\text{SOTR} = 0.0325D + 0.0218L + 0.0913I + 0.0193S - 4.9693 \quad (9)$$

$$\text{BP} = 0.0228D + 0.0115L + 0.0555I + 0.0122S - 3.3256 \quad (10)$$

$$\text{SAE} = -0.0142D - 0.0065L - 0.0288I - 0.0063S + 4.3285 \quad (11)$$

dimana

D : diameter kincir (cm)

L : panjang kincir (cm)

H : kedalaman kincir (cm)

S : kecepatan kincir (rpm)

BP: daya pengereman (kW).

Persamaan tersebut dengan asumsi: (1) pedal triangular dalam potongan melintang, dengan sudut bagian dalam 135° dan lebar sisi bukaan 5 cm; (2) mempunyai empat barisan pedal yang masing-masing 90° mengelilingi lingkaran poros; (3) barisan

pedal melingkar (offset 15° antara dua baris) pada poros seperti ditunjukkan pada gambar 2.

Maulick (2002) juga mendesain dan membuat prediksi kinerja dari aerator kincir secara eksperimental. Prediksi didasarkan pada sifat fisik air dan udara, parameter aliran, dan parameter geometri dari sistem aerator. Ketiga faktor tersebut dikelompokkan dalam variabel geometri, variabel material dan variabel proses sebagai berikut:

Variabel geometri : h = kedalaman celupan pedal (L), b = lebar pedal (L), α = sudut kelengkungan ($M^0T^0L^0$), l' = proyeksi horizontal panjang kelengkungan (L), s = jarak impeler (L), V = volume air yang diaerasi (L^3), l = panjang sudu rotor (L), d = diameter rotor (L).

Variabel material : ρ_u = massa jenis udara (ML^{-3}), ρ_a = massa jenis air (ML^{-3}), D_L = difusi molekul oksigen dalam air ($L^2 T^{-1}$), ν = viskositas kinematik air ($L^2 T^{-1}$), σ = tegangan permukaan air ($M T^{-2}$).

Variabel proses : N = putaran (T^{-1}), g = percepatan gravitasi ($L T^{-2}$). Hasilnya menunjukkan bahwa kinerja aerator kincir (SAE) berpengaruh nyata oleh parameter-parameter tersebut.

Variabel yang mempengaruhi laju perpindahan oksigen dinyatakan sebagai fungsi hubungan dari bentuk yang diberikan aerasi tangki sebagai berikut:

$$\text{SOTR}/\Delta c = f(h, b, \alpha, l', s, V, l, d, N, g, \rho_u, \rho_a, \sigma, \nu, D_L) \quad (12)$$

$$Y = f(h/d, b/d, \alpha, l'/d, s/d, V/d^3, l/d, \rho_u/\rho_a, \nu/D_L, N^2 d/g, Nd^2/\nu, N^2 d^3/\sigma) \quad (13)$$

$$\text{Ne} = f(h/d, b/d, \alpha, l'/d, s/d, N^2 d/g, Nd^2/\nu) \quad (14)$$

$$\text{SAE} = Y/\text{Ne} = f(h/d, b/d, \alpha, l'/d, s/d, V/d^3, N^2 d/g, Nd^2/\nu) \quad (15)$$

dimana,

Y = jumlah absorpsi = $\text{SOTR} \times (\nu/g^2)^{1/3}/(\Delta c \times d^3)$

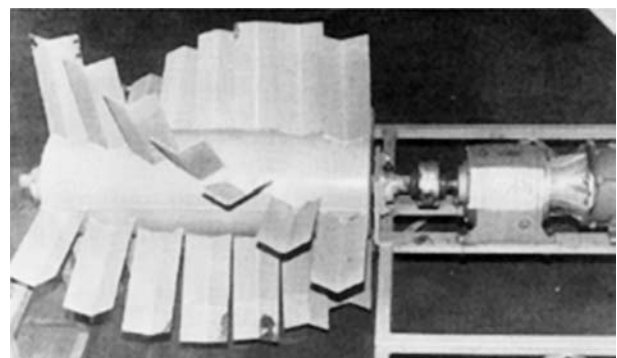
$N^2 d/g$ = bilangan Froude, Fr

Nd^2/ν = bilangan Reynolds, Re

$N^2 d^3 \rho/\sigma$ = bilangan Weber, We

ν/D_L = bilangan Schmidt, Sc

$P/(\rho N^3 d^5)$ = bilangan Daya, Ne



Gambar 2. Aerator kincir Moore dan Boyd

Nilai Ne dan SAE pada persamaan tersebut tergantung hanya pada parameter dinamik Fr dan Re sehingga persamaannya untuk kesamaan geometri sistem adalah

$$Ne = f_0(F_r, R_e) \quad (16)$$

$$SAE' = f'(F_r, R_e) \quad (17)$$

Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk variasi perbandingan kedalaman celupan pedal dengan diameter rotor (h/d) 0.025-0.225, diperoleh nilai SAE optimal pada $h/d=0.125$. Untuk variasi perbandingan lebar pedal dengan diameter rotor (b/d) 0.1-0.4, diperoleh nilai SAE optimal pada $b/d=0.325$.

Untuk variasi sudut kelengkungan (α) 0-75°, diperoleh nilai SAE optimal pada $\alpha = 45^\circ$. Untuk variasi perbandingan panjang kelengkungan proyeksi horizontal dengan diameter rotor (l'/d) 0.025-0.075, diperoleh nilai SAE optimal pada $l'/d=0.0625$. Untuk perbandingan jarak kelengkungan dengan diameter rotor (s/d) $\pi/12$ - $\pi/14$, diperoleh nilai SAE optimal pada $s/d=0.5238$. Untuk variasi perbandingan volume air yang diaerasi dengan diameter rotor (v/d^3) 76.56-89.06, diperoleh nilai SAE optimal pada $v/d^3=82.81$.

Pengaruh penskalaan, untuk diameter yang sama peningkatan bilangan Froude meningkatkan nilai SAE , demikian juga dengan pembesaran diameter pada bilangan Froude yang sama mempunyai kecenderungan meningkatkan nilai SAE . Demikian juga dalam kaitannya dengan bilangan Reynold, namun pembesaran diameter pada bilangan Reynold yang sama mempunyai kecenderungan menurunkan SAE . Untuk diameter yang sama peningkatan bilangan Froude menurunkan nilai Ne , demikian juga dengan pembesaran diameter pada bilangan Froude yang sama mempunyai kecenderungan menurunkan nilai Ne . Begitu juga dengan bilangan Reynold, namun pembesaran diameter pada bilangan Reynold yang sama mempunyai kecenderungan meningkatkan nilai Ne .

Setiawan (2002) mendesain kincir dengan pedal menyerupai pedal kincir buatan Taiwan dengan panjang 214 cm, lebar 200 cm dan tinggi 80 cm. Aerator ini dapat meningkatkan kadar oksigen dari 5 ppm sampai batas jenuh (7.5 ppm) hanya dalam waktu 2 jam dengan membutuhkan daya sebesar 980 Watt.

Susanti (2003) melakukan pengujian lanjut kincir tersebut dengan memvariasikan diameter kincir (600 mm, 650 mm, 700 mm), kecepatan putar (80 rpm, 98 rpm, 116 rpm) dan kedalaman operasi pedal (50 mm, 100, 150 mm). Hasil pengujian menunjukkan efek aerasi terbaik dihasilkan oleh kincir dengan diameter 700 mm, kecepatan putar 98 rpm dan kedalaman operasi pedal 50 dan 100 mm.

Prasetya (2005) mengembangkan kincir hasil

desain Radite (2003) dengan variasi kelengkungan pedal (25°, 35°, 45°), jumlah lubang (20, 30, 40), kemiringan pedal (0°, 15°, 30°), dan kecepatan operasi (83, 96, 124 rpm).

Parameter pengujian yang dilakukan adalah diameter semburan, lebar semburan, persentase sebaran air, coverage area, coverage volume dan konsumsi daya listrik. Meskipun tidak disertakan parameter kelarutan oksigen (DO), namun hasil pengujian tersebut dapat memberi gambaran pengaruh desain terhadap efisiensi dari sebuah aerator kincir.

Hasil pengujian menunjukkan konsumsi daya terkecil adalah 518 watt pada perlakuan lengkung 35°, jumlah lubang 30, kemiringan pedal 30° dan kecepatan putar 96 rpm. Sedangkan daya terbesar adalah 625 watt pada perlakuan lengkung 35°, jumlah lubang 20, kemiringan pedal 15° dan kecepatan putar 124 rpm.

Diameter semburan air terbesar adalah 283 cm pada perlakuan lengkung 25°, jumlah lubang 20, kemiringan putar 0°, dan kecepatan putar 124 rpm. Sedangkan diameter semburan terkecil terjadi pada lengkung pedal 45°, jumlah lubang 40, kemiringan pedal 30°, dan kecepatan putar 83 rpm yaitu 113 cm. Lebar semburan air terbesar adalah 120 cm pada perlakuan lengkung pedal 45°, jumlah lubang 30, kemiringan pedal 0°, dan kecepatan putar 124 rpm. Sedangkan lebar semburan terkecil adalah 34 cm pada perlakuan pedal lengkung 25°, jumlah lubang 40, kemiringan pedal 30°, dan kecepatan putar 83 rpm. Persentase sebaran air terbesar adalah 99% yang terjadi pada perlakuan lengkung 25°, jumlah lubang 30, kemiringan pedal 15°, dan kecepatan putar 124 rpm. Sedangkan persentase sebaran terkecil terjadi pada perlakuan lengkung 35°, lubang 40, kemiringan pedal 30°, dan kecepatan putar pedal 83 rpm yaitu 50%.

Coverage area terbesar adalah 38761 cm² pada perlakuan lengkung 45°, jumlah lubang 20, kemiringan putar 0°, dan kecepatan putar 124 rpm. Sedangkan coverage area terkecil adalah 4360 cm² pada perlakuan lengkung 35°, jumlah lubang 40, kemiringan pedal 35°, dan kecepatan putar 83 rpm. Coverage volume terbesar adalah 4306771 cm³ pada perlakuan lengkung 45°, jumlah lubang 20, kemiringan putar 0°, dan kecepatan putar 124 rpm. Sedangkan coverage volume terkecil adalah 130804 cm³ pada perlakuan lengkung 35°, jumlah lubang 40, kemiringan pedal 30°, dan kecepatan putar 83 rpm.

Kombinasi perlakuan pedal lengkung 45°, jumlah lubang 20, kemiringan 0°, dan kecepatan putar 124 rpm menghasilkan efek aerasi yang optimum. Sedangkan perlakuan yang mempunyai keeratan paling tinggi terhadap besarnya coverage volume sekaligus kelarutan oksigen adalah kecepatan putar pedal.

Rosmawati (2009) melakukan pengujian kelarutan oksigen (DO) dengan bentuk desain pedal

seperti rancangan Prasetya (2005) pada variasi kecepatan 117, 138 dan 157 rpm. Hasil pengujian menunjukkan *DO* maksimum sebesar 4.88 mg/l di permukaan kolam diperoleh pada pengoperasian kincir pada kecepatan putar 157 rpm dengan kedalaman kincir 5 cm dari permukaan kolam, sedangkan *DO* minimum 2.84 mg/l di dasar kolam pada kecepatan 117 rpm.

Diameter semburan terbesar didapat pada perlakuan pedal lengkung 45°, jumlah lubang pada pedal 20, posisi pedal datar dan kecepatan putar 157 rpm. Diameter lubang terkecil didapat pada perlakuan pedal lengkung 45°, jumlah lubang pedal 20, posisi pedal datar dan kecepatan putar 117 rpm. Coverage area terbesar didapat pada perlakuan dengan kecepatan putar 157 rpm yaitu 41081 cm², sedangkan coverage area terkecil dengan kecepatan putar 117 rpm seluas 30485 cm². Konsumsi daya listrik terkecil adalah 560 watt pada kecepatan putar 117 rpm, sedangkan konsumsi daya listrik terbesar pada kecepatan putar 157 rpm dengan 622 watt.

Berdasarkan pengkajian yang telah dilakukan, selama ini usaha peningkatan efisiensi aerasi dilakukan dengan pengembangan sudu secara dua dimensi. Hal ini tidak memberikan hasil yang optimal karena kebutuhan daya untuk aerasi berbanding lurus dengan kenaikan laju aerasi, sehingga perlu alternatif pengembangan desain lainnya. Salah satunya yaitu pengembangan desain sudu tiga dimensi. Geometri sudu tiga dimensi seperti model *furrower* dapat mengurangi gaya hambat sehingga menurunkan konsumsi energi aerasi. Optimasi desain dapat dilakukan pada geometri sudu meliputi; bentuk, kelengkungan, kemiringan, diameter dan persentase luasan lubang dan kondisi operasi kincir meliputi; putaran dan kecelupan sudu.

Alternatif lainnya adalah pengembangan desain sudu dinamis, dimana selama ini usaha peningkatan efisiensi aerasi dilakukan dengan pengembangan sudu secara statis. Hal ini didasari bahwa daya aerasi diperlukan selama sudu memasuki air, sedangkan efek aerasi hanya terjadi saat sudu hendak keluar dari air. Mekanismenya dilakukan dengan menggerakkan sudu untuk menutup saat memasuki air dan membuka saat keluar dari air. Dengan mekanisme tersebut dapat mengurangi gaya hambat sudu namun tetap memberikan efek aerasi yang tinggi sehingga akan dapat meningkatkan efisiensi aerasi.

Simpulan

Aerator tipe kincir merupakan aerator yang paling umum digunakan untuk tambak budidaya air karena mempunyai keunggulan dibandingkan aerator tipe lainnya. Pengembangan desain dan kondisi operasi aerator kincir telah banyak dilakukan, efisiensi aerasi yang diperoleh 1-2.5 kg O₂ kWh⁻¹. Alternatif pengembangan dapat dilakukan secara statis

dengan pengembangan desain sudu tiga dimensi dan optimasi geometri, sedangkan secara dinamis dengan pengembangan desain kincir dengan sudu bergerak.

Daftar Pustaka

- Ahmad T, Boyd CE. 1988. Design and performance of paddle wheel aerators. *Aquac Eng* 7:39-62.
- American Society of Civil Engineers. 1992. Measurement of oxygen transfer in clean water. ANSI/ASCE 2-91. New York.
- Avnimelech Y, Mozes N, Weber B. 1992. Effects of aeration and mixing on nitrogen and organic matter transformations in simulated fish ponds. *Aquac Eng* 11:157-169.
- Benson BB, Krause D. 1984. The concentration and isotopic fractionation of oxygen dissolved in freshwater and seawater in equilibrium with the atmosphere. Lim no1. *Oceanogr* 29:620-632.
- Bhuyar LB, Thakre SB, Ingole NW. 2009. Design characteristics of curved blade aerator w.r.t. aeration efficiency and overall oxygen transfer coefficient and comparison with CFD modelling. *International Journal of Engineering, Science and Technology* 1: 1-15.
- Boyd CE. 1982. Water quality management for pond fish culture. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Boyd CE. 1995. Deep water installation of a diffused-air aeration system in a shallow pond. *Appl Aquac* 5:1-10.
- Boyd CE. 1998. Pond water aeration systems. *Aquac Eng* 18:9-40.
- Boyd CE, Ahmad T. 1987. Evaluation of aerators for channel catfish farming. Alabama agricultural experiment station. Bulletin 584:52.
- Boyd CE, Martinson DJ. 1984. Evaluation of propeller-aspirator pump aerators. *Aquaculture* 36:283-292.
- Boyd CE, Moore JM. 1993. Factors affecting the performance of diffused-air aeration system for aquaculture. *Appl Aquac* 2:1-12.
- Fast AW et al. 1999. Paddle wheel aerator oxygen transfer efficiencies at three salinities. *Aquac Eng* 19:99-103.
- Kordi, MGHK, Tacung AB. 2007. *Pengelolaan kualitas air dalam budidaya perairan*. Jakarta: PT Rineka Cipta.
- Laksitanonta S, Singh S, Singh G. 2003. A review of aerators and aeration practices in Thai Aquaculture. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America* 34 (4):64-71.
- Lekang OI. 2007. Aquaculture Engineering. UK: Blackwell Publishing.
- Moore JM, Boyd CE. 1992. Design of small paddle wheel aerators. *Aquac Eng* 11:55-69.
- Moore JM, Whitis GN. 1999. Vertical water circulation capabilities of an electric paddle

- wheel aerator and dissolved oxygen loss due to daytime aeration. *Appl Aquac* 9(3);25-36.
- Moullick S, Mal BC, Bandyopadhyay. 2002. Prediction of aeration performance of paddle wheel aerators. *Aquac Eng* 25:217-237.
- Peterson EL, Walker MB. 2002. Effect of speed on Taiwanese paddelwheel aeration. *Aquac Eng* 26:129-147.
- Prasetia A. 2005. Kinerja aerator tipe kincir pada berbagai kondisi kelengkungan, jumlah lubang, kemiringan, dan kecepatan putar pedal. [skripsi]. Bogor. Fakultas Teknologi Pertanian. Institut Pertanian Bogor.
- Rogers GL. 1989. Aeration and circulation for effective aquaculture pond management. *Aquac Eng* 8:349-355.
- Romaire RP, Merry GE. 2007. Effect of paddle wheel aeration on water quality in crawfish pond. *Appl Aquac* 19(3):61-75.
- Rosmawati S. 2009. Pengaruh modifikasi aerator kincir tipe pedal lengkung pada peningkatan kadar oksigen air. [skripsi]. Bogor. Fakultas Teknologi Pertanian. Institut Pertanian Bogor.
- Ruttanagosrigit W, Musig Y, Boyd CE, Sukchareon L. 1991. Effect of salinity on oxygen transfer by propeller-aspirator-pump and paddle wheel aerators used in shrimp farming. *Aquac Eng* 10:121-131.
- Setiawan RPA. 2002. Aerator tipe kincir. Poster pada seminar nasional Crustaceae ke-2. Bogor 22-23 Agustus 2002.
- Susanti H. 2003. Kinerja aerasi kincir aerator pada berbagai kondisi putaran, ukuran diameter, dan kedalaman operasi. [skripsi]. Bogor. Fakultas Teknologi Pertanian. Institut Pertanian Bogor.
- Vinatea L, Carvalho JW. 2007. Influence of water salinity of the SOTR of paddle wheel and propeller-aspirator-pump aerators, its relation to the number of aerators per hectare and electricity cost. *Aquac Eng* 37:73-78.
- Wyban JA, Pruder GD, Leber KM. 1989. Paddle wheel effect on shrimp growth, production and crop value in commercial earthen ponds. *J World Aquac Soc* 20:18-23.